

【補助事業概要の広報資料】

補助事業番号 27-146
補助事業名 平成27年度 上下肢ロボットにおける関節剛性制御と手先押し付け力の高分解能化 補助事業
補助事業者名 岡山県立大学 情報工学部 井上貴浩

1 研究の概要

本研究では、ロボットの関節に可変のコンプライアンス特性を付与するために、工業用機械製品の3次元トルク伝動機構に利用されるポリウレタン丸ベルトを関節に拮抗的に配置した単関節駆動機構を提案し動作検証を行う。本機構では、直径3mmの小径丸ベルトを振ることによって生じる縮み方向への引張力（収縮力）を利用してロボットの関節を回転させる点が特徴となる。

研究内容や成果は以下に記載している通りであるが、4つの小課題に分けて詳述していく。

- (1) 「ねじりゴム拮抗配置設計」と「マイコンによるDCモータ回路設計」に関する研究
- (2) 「ステップモータによる協調駆動回路と動作確認」と「ねじりゴムアクチュエータの手先力計測」に関する研究
- (3) 「ねじりゴムアクチュエータの収縮力モデル導出」と「電流計測とジャイロによる関節角推定法」に関する研究
- (4) 「手先力推定手法の提案」に関する研究

特に、本研究ではクローズドループでの関節角制御が提案機構により可能であることを示し、加えてロボット手先の接触力制御も可能であることを明らかにする。特に、試作機1号では設計上の問題により関節トルクが不足していた。そのようなことから、本研究ではT型のリンクを用いてロボットの動作検証と上記の制御実験を行う。具体的には、単関節ロボットによる関節角の位置制御とロボット手先での押し付け力制御を行い、両結果から提案機構の特徴や生体模倣の観点からその有用性を明らかにする。

2 研究の目的と背景

ロボット革命と言われている昨今、産業用途のみならず生活住環境へのロボットの導入が徐々に進んでいる。生活支援や介助支援を目的としたロボット、ならびにリハビリテーションロボットなどが近年特に増加傾向にある。今後ロボットが人と接する機会が増え、両者の協調作業に加えて物理的に接触するインタラクションが多くなると予想される。このとき、ロボットに必要なのは手先のコンプライアンスや柔らかい関節剛性であり、それらを実現するための駆動機構や制御手法が不可欠となる。そのようなことから本研究では、ロボット関節に可変コンプライアンス（柔らかさ）を付与できる拮抗駆

動システムを開発し、位置制御による動作検証を行うことで本システムの有効性を明らかにする。

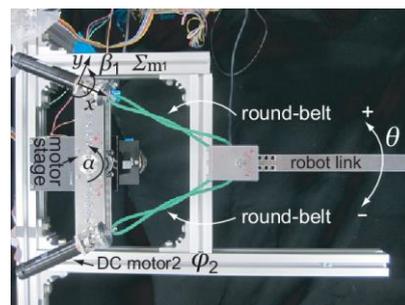
関連研究では、糸や紐をロボットフィンガの各関節に通しモータで振りを加えることで生じる縮みを利用し指全体を屈曲させている。ここでは、指先による引張力が最大で5N程度となっている一方で、指先が物体に接触する前の位置制御に関しては示されていない。

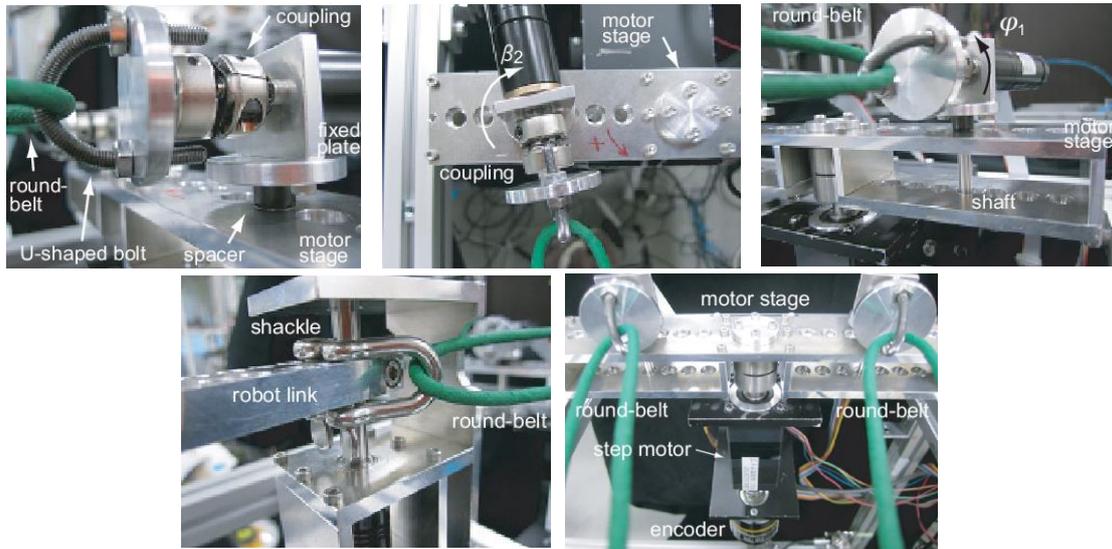
Gaponovらは、高強度繊維を編みこんだ糸（ベクトラン）を用いて振りにより生じる縮み量をモデル化し、重量物の持ち上げ位置や速度のセンサレス制御に成功している。これらはモデル化誤差が比較的小さく収縮力による可搬性能も良好であるが、100回転程度の振りを加えてはじめて10%程度の縮み量に到達できる。そのようなことから、繊維素材の振りによる収縮力を応用したこれらの研究は搬送作業などに適している一方、力制御や位置制御タスクを必要とするロボット関節の駆動メカニズムには適さないと考えられる。また、Popovらは装着型外骨格ロボットの肘関節の屈曲動作に同様の振りアクチュエータを採用し、力センサを使わずに肘関節の回転角度とモータトルクから持ち上げ動作の筋発揮力を推定している。これらの試みはパワーアシストや運動支援、ならびにリハビリテーション用途を指向しており、協調作業のような人との対面的なインタラクションを目的とした研究ではない。そのようなことから本研究では第1報として、ロボットの関節に可変のコンプライアンス特性を付与するために、工業用機械製品の3次元トルク伝動機構に利用されるポリウレタン丸ベルトを関節に拮抗的に配置した単関節駆動機構を提案し動作検証を行う。

3 研究内容

(1) 「ねじりゴム拮抗配置設計」と「マイコンによるDCモータ回路設計」に関する研究

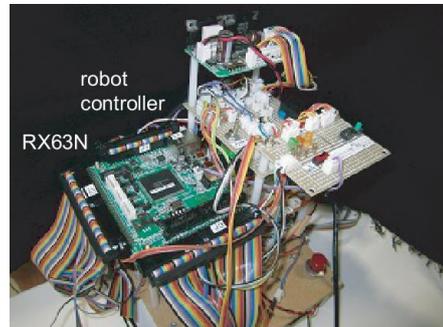
本課題で開発した小径丸ベルトを用いた拮抗型振り駆動機構による単関節ロボットを右図に示す。このロボットでは、モータステージ上に2台の直流モータを配置し、ロボットの関節との間に丸ベルトを通して1本ずつ拮抗的につないでいる。丸ベルトは硬質ポリウレタン樹脂を原材料としシームレス構造となっているため、次頁の図に示すようにベルトの一方をモータ側のU字ボルトに通し、他方を関節側のシャックルに通すことで接続している。また、両モータは円盤シャフトに締結した上で、モータステージ上からベアリングを介して挿入されており、右図に示す各モータ座標系z軸周りに摩擦フリーで自由に回転することができる。この機構により、モータが常に丸ベルト長手方向に向くようにステージ上で自転できる構造となっている。さらに、モータステージは下部のステップモータにより駆動でき、ステージ回転角に加えてリンク関節角も個別のロータリエンコーダにより取得可能となっている。また、モータステージ上には実験ごとにモータ位置を変更できる





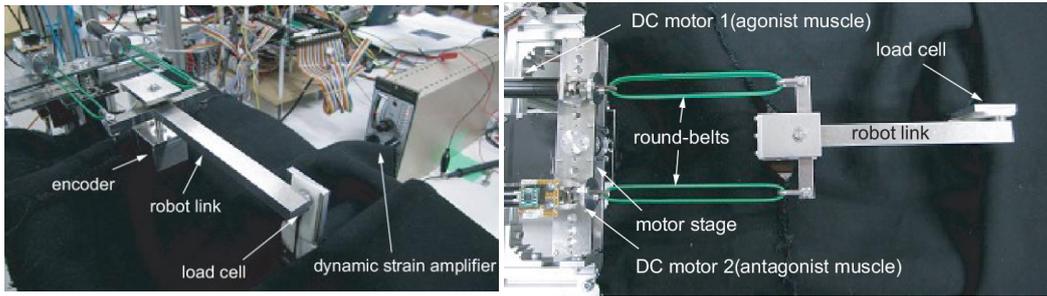
ように等間隔で7つの設置穴を設けており、両丸ベルトの接続角度を7通りの中から選択することができる。結果的に本駆動機構では丸ベルトを振ることによって長手方向への収縮変位が生じ、その収縮によりリンク関節が動作するようになる。加えて、丸ベルトの振り量にかかわらずステッピングモータの駆動によるリンク関節の回転も容易に実現可能である。

次に、本項目で開発したロボットでは制御回路としてマイクロコンピュータを用いており（右図）、直流モータ制御には安価な速度制御用ドライバを使用している。このドライバはPWM信号のduty比により容易に速度制御が可能であるが、一般的にトルク制御や力制御には不向きである。しかしながら、ここで提案しているTwist-drive機構は直流モータの回転により生じる丸ベルトの振りにより収縮力を生成する。したがって、不規則振れが生じる振りモーメントを上回るトルク特性を有するモータとドライバを選定することで、ベルトの振りモーメントに対する反力とモータトルクがつり合うduty比が存在することになる。そのようなことから、振り量（角度）や関節角を制御量としduty比を制御入力とするPI制御を施すことで、力制御類似の構成が可能となる。このように、本駆動機構が有する物理特性をうまく利用することで、速度制御用ドライバの力制御への変換が可能となる。



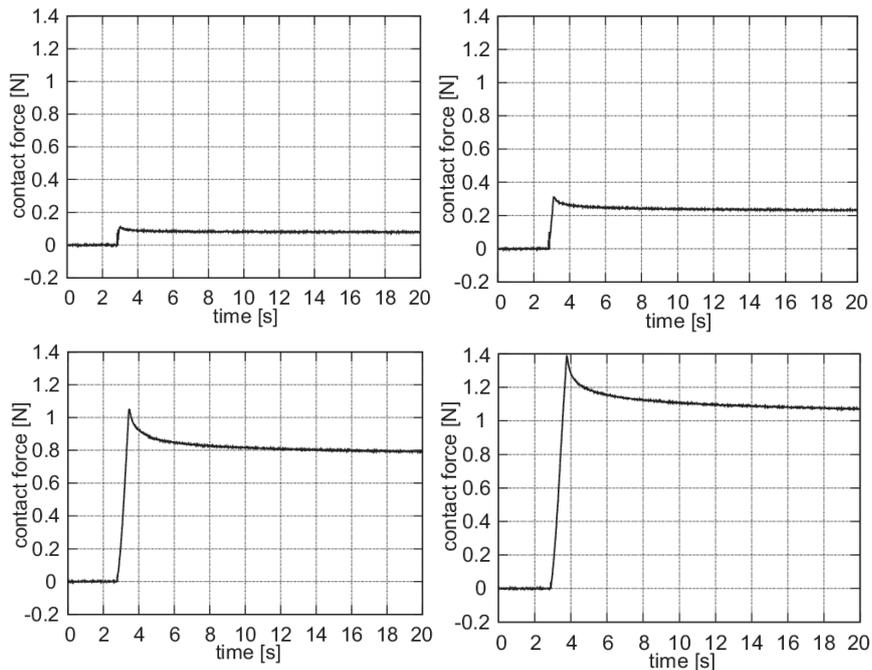
（２）「ステップモータによる協調駆動回路と動作確認」と「ねじりゴムアクチュエータの手先力計測」に関する研究

本項目では、当研究室の先行研究において開発した丸ベルト拮抗駆動機構においてリンク形状をT型に変更し、次頁図のような単関節ロボットを設計製作した。ここで、機構的特徴



を再記する. 本ロボットには関節周りに直径 2 mm 及び 3 mm の硬質ポリウレタンを材料とする丸ベルトを拮抗的に配置しており, 両ベルトを直流モータで振ることによって生じる収縮力で関節を回転駆動することができる.

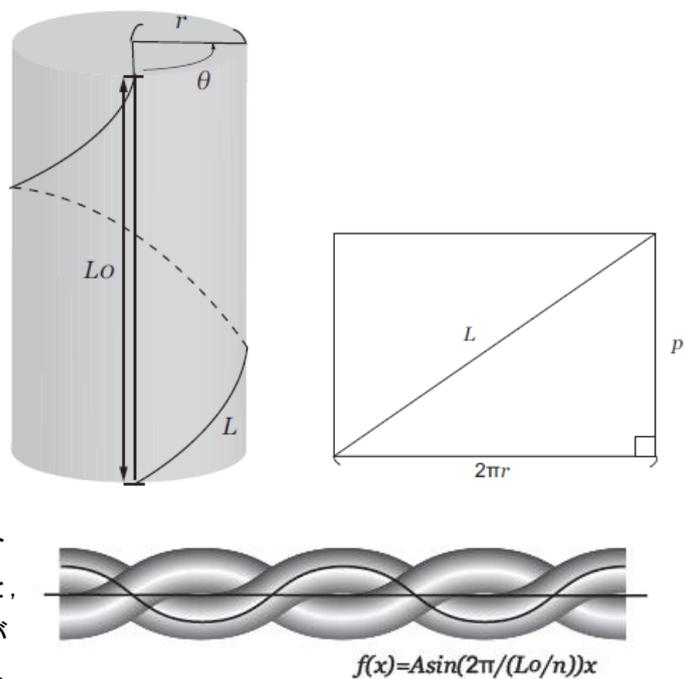
次に, 丸ベルトの振り量制御を行い, そのときのロボット手先に生じる押し付け力を計測し観察する. この実験により, 丸ベルトを用いた本機構が力制御においてどのような物理特性を有するかを検証する. この実験では, 両側ともベルト 1 本とし押し付け力を定格 10 N のロードセルで計測する(上図). まず, リンクを真っ直ぐにした初期姿勢から前章と同様に, 両丸ベルトの緩みを抑えるための初期振り(1 振り)を与え安定させる. 次に, 主動筋側丸ベルトを PI 制御にて別試行で 2, 4, 8, 10 振りさせる. また, ロードセルを台に固定しリンクの先端を接触させることで押し付け力を計測する. このとき, リンクが約 1° 回転したときに接触が生じるような位置関係としている. なお, 動ひずみ計による応答周波数と計測によるサンプリング周波数はともに 1kHz である. 下図の結果から分かるように, 振り量が増えるにしたがって押し付け力が全体的に大きくなること分かる. また, 各振り数に達した時点でいずれの結果においても押し付け力に最大値が現われる. その後すぐに減少していき定常値に収束する. これはエラストマー材料特有の応力緩和現象であり, ポリウレタン材が主成分となる組成になる



ためである。また、ベルト振り量が大きいほど応力緩和の影響が大きい。これは、本実験の振り量制御では振り数のステップ目標を与えているためである。つまり、丸ベルトに急激に振りが加えられその状態を維持したまま静止する結果、粘性に起因する大きな減衰力によりベルトの内部変形が遅れて進むためと推察される。特に、右下図(前頁)においては緩和現象が10 s以上続いていることから、本駆動機構で利用する丸ベルトが大きな時定数を持ち動特性が極めて低いことが明らかになる。

(3) 「ねじりゴムアクチュエータの収縮力モデル導出」と「電流計測とジャイロによる関節角推定法」に関する研究

丸ベルトを振ることによって生じる収縮力のモデルを振り角度と時間のみを考慮して導出する。ここでは、1本の輪状の丸ベルトに振りを加える動作と、2本の丸ベルトが互いに巻きつく動作に関して個別にモデル化を行う。前者に関しては、収縮力モデルで使用する丸ベルトの初期状態長さからの伸びは、右上図のようにベルト自体が振れることによる伸びと、右下図のように丸ベルト同士が巻きつき合うことによる伸びとに分けて考える。さらに、収縮力モデルではヤング率も用いるが、そのヤング率は実験から導出する。まず、ベルトの振れによる変位モデルは次式となる。

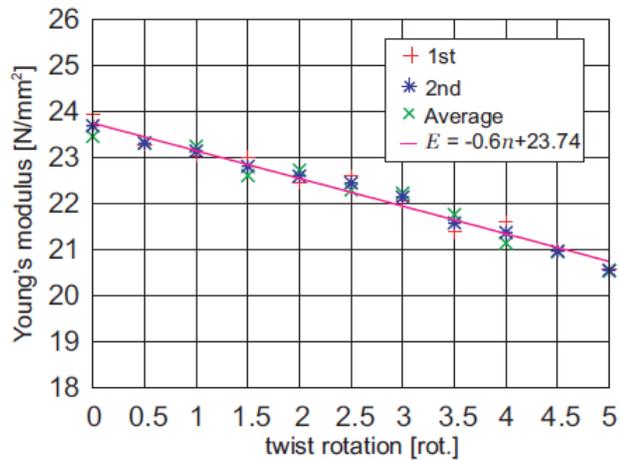
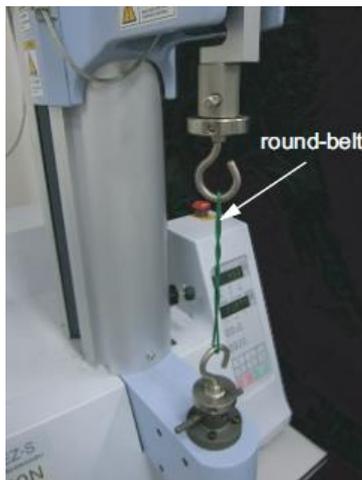


$$\Delta L_1 = \theta \sqrt{r^2 + \left(\frac{L_0}{\theta}\right)^2} - L_0,$$

加えて、巻きつき合うことによる変位モデルは次式となる。

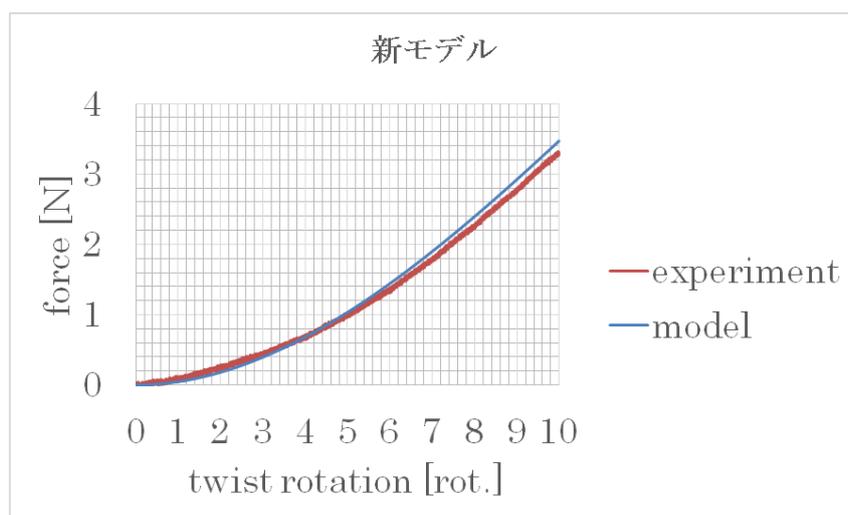
$$\Delta L_2 = \int_0^{L_0} \sqrt{1 + \left(\frac{2nA\pi}{L_0}\right)^2 \cos^2\left(\frac{2n\pi}{L_0}x\right)} dx - L_0,$$

次に、本項目でのヤング率モデル導出には、次頁左図に示す引張試験機(島津製作所)



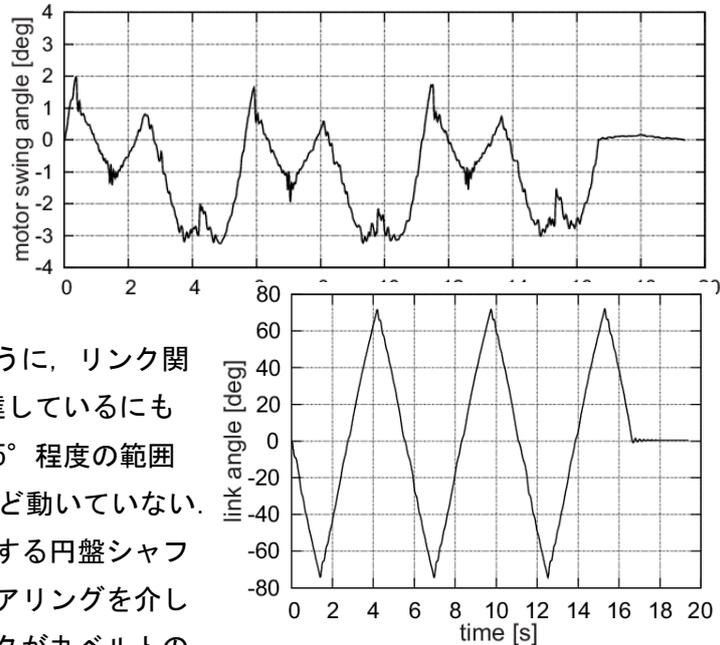
と周長260mm, 直径2mm の丸ベルトを用いる. この丸ベルトに0~5 回の初期振りを加えた状態で引張試験機に取り付け, 2mm/s で引張力を与える. この初期振りは0~5 振りまでの範囲で0.5 振りずつ増加させ, 各振り数で2 回ずつ, 計22 試行を行う. また, 丸ベルトはいずれの場合も1N を初期荷重として実験を開始し, 引張力が50N に達したとき実験を終了する. このとき得られる丸ベルトの収縮力と変位から応力及びひずみを求め, 応力-ひずみ曲線を作成し傾きを求めることでヤング率を得る. すべてのデータをまとめ図示した結果が右上図となる. この図の縦軸はヤング率, 横軸は振り数を示す. 各振りの1 回目と2 回目にはばらつきが見られず, 全体の傾向として振りが増えたとヤング率は線形的に下がっていく傾向にあることが分かる. このことからヤング率モデルには線形近似を用いることができ, 得られたモデルが次式となる.

$$E = -0.6n + 23.74 \text{ [N/mm}^2\text{]}.$$



このヤング率モデルを利用した丸ベルト収縮力モデルと実験値との比較を上図に示す. 結果から分かるように, ほとんど誤差がなくモデルの妥当性が明らかになった.

次に、本機構の特徴であるモータステージ上のモータ自転機構の有効性を確認するために、モータ2の固定部にジャイロセンサを取り付け自転角を求める。この検証では、一定速度でステッピングモータを駆動しモータステージを回転させ $\pm 25^\circ$ の範囲内で往復運動させる。ここでの両直流モータの設置位置はモータステージ上の内側から3番目であり駆動は行わず丸ベルトには振りを加えないものとする。そのときの結果を右図



に示す。結果から分かるように、リンク関節角が $\pm 80^\circ$ 近くまで到達しているにもかかわらずモータ自転角が 5° 程度の範囲内に制限されておりほとんど動いていない。このように、モータを固定する円盤シャフトをモータステージ内にベアリングを介して挿入することで、各モータが丸ベルトの長手方向と直線上に並び、その結果ベルトの振り変形がらせん状に進行するときが発生する収縮力の垂直方向成分を吸収することができることを明らかにした。

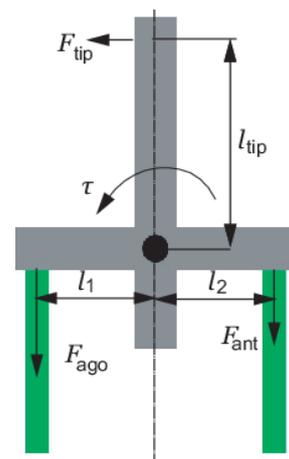
(4) 「手先力推定手法の提案」に関する研究

本項目では、右図に示すようなTwist-driveを拮抗的に配置した1リンクロボットの手先押し付け力モデルを導出する。まず、リンクの回転軸周りのトルクは、主動筋、拮抗筋側の丸ベルトの収縮力 F_{ago} , F_{ant} とモーメントアーム長 l_1 , l_2 より次式のように表せる。

$$\tau = \tau_{ago} - \tau_{ant} = F_{ago}l_1 - F_{ant}l_2.$$

よって、手先押し付け力 F_{tip} は回転軸と手先の距離 l_{tip} より次式のように表せる。

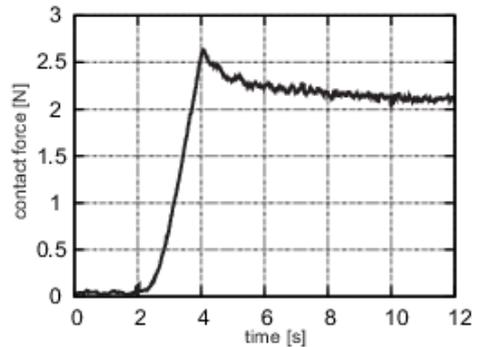
$$F_{tip} = \frac{\tau}{l_{tip}}.$$



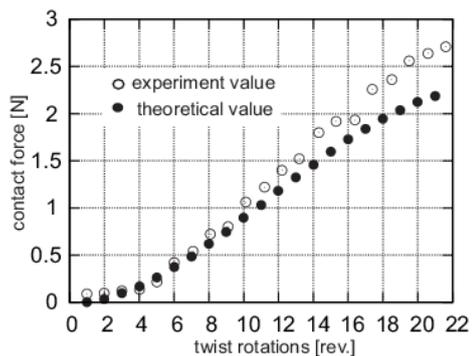
次に、上式の手先押し付け力モデルの妥当性を検証するために、周長600mmの丸ベルトを用いて振り量(回転角)の制御を行い、ロボットリンクの駆動時の手先押し付け力をロードセルを用いて計測する。ここでは、DCモータ1(主動筋)、DCモータ2(拮抗筋)に接続された丸ベルトをそれぞれベルトの緩みをとるための1回転制御が収束し安定

した後、主動筋側のみをさらに1振りずつ1~22回転させる。なお、本実験で利用する制御則はモータ付属のエンコーダ角度を制御量とするPI制御である。ここで、振り量とエンコーダ角度が等しいものとし、両ゲインは $Kp1=33$, $Ki1=0.002$, $Kp2=35$, $Ki2=0.0035$ とし、制御周期は2msとしている。以上のような制御を行い

ロボットリンクの回転運動を生成する。また、押し付け力はロボット固定台にロードセルを固定しリンクの先端を接触させることで手先押し付け力を計測する。ロードセルはリンクが約 1° 回転したときに接触する位置に固定されている。右上図に全試行から抜粋したデータに基づいて20振りの接触力の時間応答の10点移動平均を示す。結果に見られるように、4s以降



で定常状態における接触力の減少が確認できる。これは、粘弾性物体特有の応力緩和現象が生じているためである。ここでの収縮力モデルでは応力緩和のような動特性は考慮されていないため、モデル式から得られる接触力は4s時における接触力となる。各振り数における接触力と上式から推定した理論値を右下図に示す。結果から分かるように、理論値と実験値がほぼ等しく、今回求めたモデル式が妥当であると考えられる。



一方で、振り数の増大にともない実験値の方が理論値よりも大きくなっていることが分かる。これは、本解析で求めたヤング率モデルが5振りまでの振り量から線形近似した値となっているためだと考えられる。つまり、0振りと20振りのヤング率を比較するとヤング率が半分程度まで小さくなることになる。ゆえに振り数が増えるほど理論値と実験値の差が大きくなると考えられる。また、この結果から振り数が増えるとヤング率はある一定の値に収束する可能性があることが示唆される。

4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

人とロボットが協調し共存できる社会は親和性の極めて高いロボットの開発の成否にかかっている。少子高齢化社会で起こり得る種々雑多な問題を解決できるロボットや、安心・安全な社会の実現に役立つロボット、便利でゆとりある社会の実現に役立つロボットなど、ロボットが活躍できる場面は極めて多い。しかしながら、現状においては人の足元程度の低い位置で動作するお掃除ロボットが普及しているに過ぎない。各家庭への汎用ロボットの導入事例が皆無であることを考慮すると、共存社会の実現には未だハードルが高いことが示唆される。そのハードルとは共存環境においてロボットが人に危

害を加えてしまうことであり、傷害を生じさせないための衝突回避や障害物回避問題が従来からの主流となっている。それらの試みは極論すれば、人とロボットが接触することのない環境を指向するものであり、共存社会を目指すものとは言えない。本研究の目指すところは、近年多発する大規模災害に関して防災から減災へとシフトする流れに類似する。ロボットのいる暮らしの中で起こり得る衝突やそれに起因する傷害を完全に抑え込むのではなく、傷害の程度を和らげる取り組みが必要だと考えられる。このように現状を把握すると、本研究で開発に成功した丸ベルト拮抗駆動ロボットは”柔らかい関節”を実現でき、人との協調作業における傷害を減らすことが可能になる。したがって、今後実社会でのロボット普及に弾みがつくと考えられる。

5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

本研究は、一昨年度から小規模で始めており、本助成による昨年度の研究でロボットの設計製作や新しい知見を多く得ることができました。この研究の着想は、申請者の研究歴（内容）に大きく依存しています。申請者らは先行研究においてヒト腕サイズのロボットアームを設計開発しており、この機構は3関節を有し各関節には線形バネと糸を拮抗配置したものとなっています。よって、ロボット全体で6個のバネにより関節を屈曲伸展する駆動原理となっています。このときの考察において、糸を巻き取る機構をよりコンパクトにできる新たな機構の開発が急務であると結論づけました。また、線形バネを利用しているため、上肢ロボットの手先が大きく振動する現象が現れていました。これらの問題を改善することと同時に、コンパクト化の指標としてロボットハンドの新設計にも照準を定めることになり、本研究の申請となりました。このような位置づけであったことから、本研究の目標がしっかり定まっており、小課題ごとの研究計画や方法が明確になっていました。その結果、良好な成果を多く出すことができたと分析しています。

6 本研究にかかわる知財・発表論文等

特許権等の知的財産に関する申請等がございません。発表論文を以下に記載しております。

論文一覧

【学術誌論文】

- [1] Takahiro Inoue, Ryuichi Miyata, Shinichi Hirai, “Fictitious Target-trajectory Forming Control for Redundant Manipulator and Active Regulation of Impulsive Forces”, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.27, No.5, pp.552--562, 2015. 査読有

【国際会議論文】

- [2] Takahiro Inoue, Sizuka Yamamoto, Ryuichi Miyata, Shinichi Hirai, “A

Robotic Joint Design by Agonist and Antagonist Arrangement with Twisting Small-diameter Round-belts”, IEEE/RSJ, IROS, pp.1751-1756, 2015/9/29, Germany 査読有

【国内発表論文】

- [3] 山本, 宮田, 井上, “ポリウレタン丸ベルトのねりじによる関節駆動機構の設計”, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2015/5/18, 京都府
- [4] 井上, 小野, 宮田, 平井, “ピック&プレースを目的とした小型自律移動マニピュレータの開発”, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2015/5/19, 京都府
- [5] 宮田, 井上, ” 関節屈曲に利用するポリウレタン丸ベルトの多回転ねじり運動における静的物理特性”, 第 16 回計測自動制御学会 SI 部門, 2015/12/15, 愛知県
- [6] 宮田, 井上, ” 上肢筋の拮抗構造を模倣したポリウレタン丸ベルトによる Twist-drive 機構と制御”, 第 16 回計測自動制御学会 SI 部門, 2015/12/15, 愛知県
- [7] 井上, 平井, ” 多関節アームへの衝撃的荷重の負荷と解放時の振動抑制手法”, 第 58 回自動制御連合講演会, 2015/11/15, 兵庫県
- [8] 宮田, 井上, ” 丸ベルト拮抗型 Twist-drive 機構による接触力推定”, 日本機械学会 中国四国支部 第 54 期総会・講演会, 2016/3/9, 愛媛県
- [9] 植田, 宮田, 井上, ” 小径丸ベルトの捩り収縮力モデル” 日本機械学会 中国四国学生会第 46 回学生員卒業研究発表講演会, 2016/3/8, 愛媛県
- [10] 佐藤, 井上, ” ロボット電圧制御系における手先外力推定”, 日本機械学会 中国四国学生会第 46 回学生員卒業研究発表講演会, 2016/3/8, 愛媛県
- [11] 高見, 宮田, 井上, ” 自律移動台車搭載型多関節アームの手先制御”, 日本機械学会 中国四国学生会第 46 回学生員卒業研究発表講演会, 2016/3/8, 愛媛県
- [12] 濱野, 井上, ” 半球型柔軟指の動特性評価”, 日本機械学会 中国四国学生会第 46 回学生員卒業研究発表講演会, 2016/3/8, 愛媛県

7 補助事業に係る成果物

(1) 補助事業により作成したもの

バイオメカトロニクス研究室 2015 年度 年間研究活動報告書

(URL) http://www-bs.ss.oka-pu.ac.jp/inoue/research/houkokusyo_27-146.pdf

(2) (1) 以外で当事業において作成したもの

特にございません

8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名： 岡山県立大学情報工学部バイオメカトロニクス研究室（井上研究室）

住 所： 〒719-1197

岡山県総社市窪木111 岡山県立大学情報工学部人間情報工学科

申 請 者： 准教授 井上貴浩（イノウエ タカヒロ）

担 当 部 署： 岡山県立大学 企画広報室 （島津あい子）

E-mail： inoue@ss.oka-pu.ac.jp, aiko_shimazu@ad.oka-pu.ac.jp

U R L： <http://www-bs.ss.oka-pu.ac.jp/>